

サイフォンを用いた回路計算 Logic circuit using siphons

品川 和雅[†]
Kazumasa Shinagawa

西出 隆志[‡]
Takashi Nishide

岡本 栄司[‡]
Eiji Okamoto

概要

我々の生活にとって、計算機はなくてはならない存在である。手計算と異なり、計算機による計算は正確で、巨大な数を扱うことが容易である。現在世界中で使われている計算機は、電気を用いて記憶や演算などの基本的な処理を行っている。電気以外の物理現象を用いて計算システムを構築することは、理論的な側面のみならず、実用的な意味でも重要な研究であると考えられる。本論文では、電気を使わない新しい論理回路計算システムを提案する。使用するのは、サイフォンと一定量の水だけであり、サイフォンの原理を用いて計算が行われる。まず、シンプルな構成である 1-tube 入力サイフォン計算システムを提案する。この方式は、少ないサイフォンと単純な符号化によって実現されるが、計算過程において開栓操作を施さなければならないというデメリットが存在する。そこで、その問題を解決するために、2-tube 入力サイフォン計算システムを提案する。いずれの提案システムでも、NOT/AND/COPY 回路を構成できるため、任意の論理回路演算を実行できる。

1. 提案方式と関連研究

電気を使わない計算システムは、すでにいくつかのものが提案されている。ドミノ計算では、ドミノの倒れている状態を 1、立っている状態を 0 と符号化して、情報の伝達を行い、計算をする [2]。

また、我々の提案するサイフォン計算に近い研究としては、流体計算がある [5, 1]。これは、水が流れていることを 1、流れていないことを 0 と符号化し、計算を行う。我々の提案方式との大きな違いは、水の流れを利用しているため、入力に必要な水の量は、時間と入力数の両方に比例して、限りなく大きくなることである。提案方式で必要な水の量は、時間によらず、入力数にのみ比例する。水の量という観点において、提案方式は、流体計算より地球にやさしい計算システムである。

提案方式のように、サイフォンと一定量の水を用いて計算を行うシステムの論文は我々の知る限り存在しない。しかし、我々とは独立に、Stevens によってサイフォン計算の研究が行われていたことが、YouTube にアップロードされた動画によってわかった [3]。Stevens の方式は、提案方式の 2-tube 入力のシステムと同じように、2 本のチューブを用いて計算を行う [4]。しかし、Stevens の方式は、任意のタイミングで入力することが

できない。つまり、入力 x_0, x_1 が同時に入力されると正しい計算が行われない場合がある。計算システムにおいて、入力のタイミングに制限がかかるのは望ましくないと考えられる。提案方式では、入力のタイミングの問題は完全に解決されており、各入力はいかなるタイミングでも実行することができる。

2. 準備

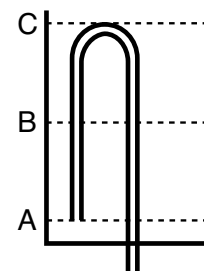


図 1: 教訓茶碗

サイフォン計算システムでは、教訓茶碗、あるいはピタゴラスカップと呼ばれる不思議なコップを用いる。教訓茶碗とは、底部分にストローが貫通しているコップである (図 1)。

このコップに水を B の高さまで注いでも水は流れないが、C の高さを超えると水は流れ出す。一度水が流れ出すと、水面が A の高さになるまで水の流れは止まらない。晩酌等で用いるとお酒を注ぎすぎるとすべてこぼれてしまうので、飲み過ぎないように、という意味を込めて教訓茶碗という名前が付けられている。教訓茶碗の動作原理は、一般にはサイフォンの原理として知られている。以降、このような教訓茶碗のことをサイフォンと呼ぶ。

サイフォンの水面 A から C までの容積を、サイフォンの容積と定義する。また、本稿で用いるサイフォンは、底面から A までの容積には水が注がれているものとし、サイフォンに入っている水には含めないこととする。容積が $2V$ である空のサイフォンに $x \geq 2V$ の容量の水を注ぐと、 x の容量の水が出力され、再びサイフォンは空になる。

サイフォンの図式を簡略化して、図 2 のように表す。左上の数字がサイフォンの容積を表し、このサイフォンの場合、容積は V である。また、サイフォンの内部の曲線は、チューブを簡略化したものである。チューブの太さや形状はすべて同じであるとし、図 2 の二股になっている部分は、水が均等に分割されていることを表す。チューブの材質等により二股チューブの加工が難しい場合は、図 3 のようにサイフォン内のチューブを 2 本に増やせば出力の水を等分割することができる。

[†]筑波大学、情報学群情報科学類、茨城県つくば市天王台 1-1-1, College of Information Science, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, Japan

[‡]筑波大学、システム情報系、茨城県つくば市天王台 1-1-1, Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, Japan

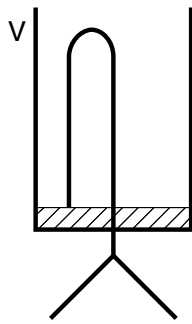


図 2: サイフンの簡略図式

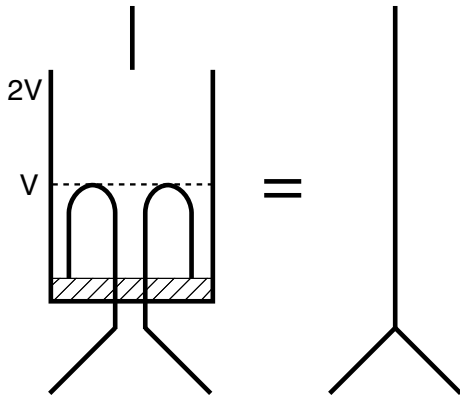


図 3: 二股チューブの構成

3. 1-tube 入力によるサイフォン計算システム

本章では、最もシンプルな方式である、1-tube 入力によるサイフォン計算システムを提案する。この方式では、次のように符号化を行う。入力 x に対応するチューブを T_x とし、 $x = 1$ のときは T_x から単位量 V の水を注ぎ、 $x = 0$ のときは水を注がない。出力 y に対応するチューブを T_y とし、 T_y から単位量 V の水が流れ出たら $y = 1$ ，そうでなければ $y = 0$ とする。

まず、NOT 回路の構成について述べる（図 4）。入力チューブを T_x ，内部にある 2 本のチューブのうち、出力用のチューブを T_y ，水を捨てるためのチューブを T_g とする。サイフンの容量は $2V$ であり、初期状態で V の水が入っている。また、初期状態では T_y は栓が閉められており、入力が終わってからしばらくした後 T_y に対して開栓操作を施す。図 7 に NOT 回路の状態遷移を示す。

次に、AND 回路の構成について述べる（図 5）。図 8 に AND 回路の状態遷移を示す。

以上で NOT/AND 回路が構成でき、任意の関数の計算が実行可能であるように思える。しかし、電流や水流と異なり、我々の方式では一定量の水で符号化を行っているため、COPY 回路が必要である。以下で、COPY 回路の構成について述べる。COPY 回路は、AND 回路に初期状態として V の水を注いだものである（図 6）。図 9 に COPY 回路の状態遷移を示す。

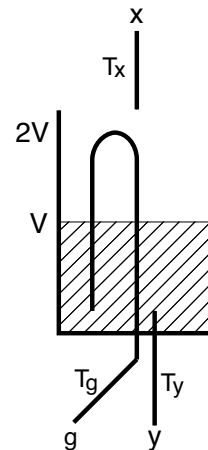


図 4: 1-tube 方式の NOT 回路

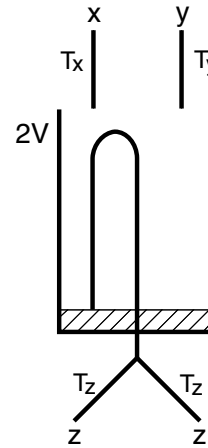


図 5: 1-tube 方式の AND 回路

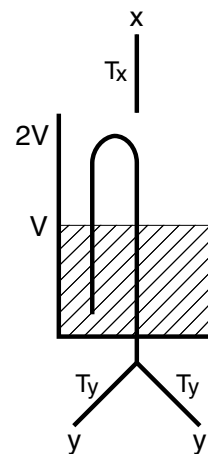


図 6: 1-tube 方式の COPY 回路

1-tube 方式の NOT 回路

入力 x , 入力チューブ T_x , 出力 y , 出力チューブ T_y , 水を捨てるためのチューブ T_g について以下のように動作する.

- $x = 0$ のとき
 T_x から水は注がれないので, T_g から水は流れない. T_y に開栓操作を施すと, T_y から V の水が流れる. よって, $y = 1$ となる.
- $x = 1$ のとき
 T_x から V の水が注がれ, T_g からすべての水が流れる. T_y に開栓操作を施すと, サイフォン内は空なので, T_y から水は流れない. よって, $y = 0$ となる.

図 7: 1-tube 方式の NOT 回路の状態遷移

1-tube 方式の AND 回路

入力 x, y , 入力チューブ T_x, T_y , 出力 z , 出力チューブ T_z について以下のように動作する.

- $x = y = 1$ のとき
入力チューブ T_x, T_y から合わせて $2V$ の水が注がれ, 2 本の出力チューブ T_z からそれぞれ V の水が流れる. よって, $z = 1$ となる.
- それ以外のとき
 T_x, T_y を合わせても, 高々 V の水しか注がれないので, どちらの T_z から水も流れない. よって, $z = 0$ となる.

図 8: 1-tube 方式の AND 回路の状態遷移

1-tube 方式の COPY 回路

入力 x , 入力チューブ T_x , 出力 y , 出力チューブ T_y について以下のように動作する.

- $x = 0$ のとき
入力チューブ T_x から水は注がれないので, どちらの出力チューブ T_y から水も流れない. よって, $y = 0$ となる.
- $x = 1$ のとき
 T_x から V の水が注がれ, 2 本の T_y からそれぞれ V の水が流れる. よって, $y = 1$ となる.

図 9: 1-tube 方式の COPY 回路の状態遷移

NOT/AND/COPY を行えるので, 1-tube 入力によるサイフォン計算システムは任意の回路計算を行うことができる. 深さ m の回路関数を計算する場合は, 回路全体の高さは, サイフンの高さのほぼ m 倍になる. 1-tube 入力によるサイフォン計算システムでは, 各入力を同時に入力する必要性や, 順に入力する必要性はなく, 任意のタイミングで入力することが可能である. Stevens の方式のように入力のタイミングを配慮する必要はないことが利点である.

ただし, NOT 回路を使用する場合, NOT 回路への入力が終わった後に開栓操作を施さなければならない. この問題は, 力学的な仕組みを用いれば解決すると考えられるが, システムが煩雑になってしまう可能性は否めない. そこで, 次章ではこの問題を解決した, 2-tube 入力によるサイフォン計算システムを提案する.

4. 2-tube 入力によるサイフォン計算システム

1-tube 入力によるサイフォン計算システムでは, 計算過程において開栓操作を行わなければならない. そこで, 開栓操作が不要な方式として, 2-tube 入力によるサイフォン計算システムを提案する. この方式では, 次のように符号化を行う. 入力 x に対し, 2 本のチューブを用意する. それぞれのチューブを T_{x0}, T_{x1} とし, $x = 0$ のときは T_{x0} から単位量の水を注ぎ, $x = 1$ のときは T_{x1} から単位量の水を注ぐ. そして, 出力 y に対して 2 本のチューブ T_{y0}, T_{y1} を用意しておき, どちらのチューブから単位量の水が流れ出たかによって出力値を決定する. このような符号化を行うと, 1-tube 入力とは異なり, どちらの入力でも単位量の水が注がれるため, 開栓操作を回避することができる.

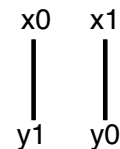


図 10: 2-tube 方式の NOT 回路

NOT 計算は簡単で, チューブを入れ替えるだけでよい (図 10). すなわち, $T_{x0} = T_{y1}, T_{x1} = T_{y0}$ とすれば NOT 計算を実行できる.

次に, AND 回路の構成について述べる (図 11). AND 回路は 4 つのサイフォン $S_{00}, S_{01}, S_{10}, S_{11}$ から構成されており, サイフンの容量はすべて V である. 入力を x, y とし, 各入力チューブ $T_{x0}, T_{x1}, T_{y0}, T_{y1}$ のそれぞれに対して, 二股チューブへ接続し, 水の量を二分割する. 図 12 に AND 回路の状態遷移を示す.

最後に, COPY 回路の構成について述べる. COPY 回路は, 1-tube 入力システムにおける COPY 回路を 2 つ用意すればよい. x を COPY したいときは, T_{x0} と T_{x1} をそれぞれ別の COPY 回路に入力すれば, COPY を行うことができる.

1-tube 入力システムのとくと同様に, 2-tube 入力システムでも NOT/AND/COPY を行えるので, 任意の回路計算を行うことができる.

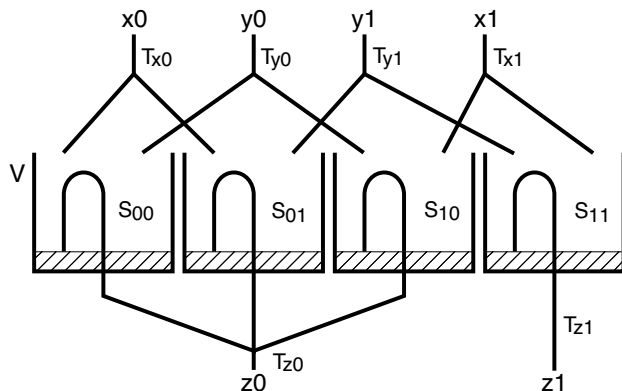


図 11: 2-tube 方式の AND 回路

2-tube 方式の AND 回路

入力 x, y , 入力チューブ $T_{x0}, T_{x1}, T_{y0}, T_{y1}$, 出力 z , 出力チューブ T_{z0}, T_{z1} について以下のように動作する。ただし, S_{ab} を 2 本のチューブ T_{xa}, T_{yb} が差し込まれているサイフォンとする。

$x = a, y = b$ とする。 T_{xa} からは S_{a0}, S_{a1} に $\frac{V}{2}$ ずつの水が注がれる。 T_{yb} からは S_{0b}, S_{1b} に $\frac{V}{2}$ ずつの水が注がれる。水が流れ出すサイフォンは, S_{ab} だけである。 S_{00}, S_{01}, S_{10} からは T_{z0} が, S_{11} からは T_{z1} が接続されているため, S_{ab} から水が流れ出すと, $T_{z_{a \wedge b}}$ から水が出力される。よって, $z = a \wedge b$ となる。

図 12: 2-tube 方式の AND 回路の状態遷移

謝辞

本稿に対し有益な意見をいただいた新・明るい暗号勉強会の皆様に感謝する。本研究の一部は、公益財団法人倉田記念日立科学技術財団 倉田奨励金による補助のもとで行われた。

参考文献

- [1] N. M. Morris, Logic circuits, McGraw-Hill, 1969.
- [2] S. O'Keefe, Implementation of Logical Operations on a Domino Substrate, International Journal of Unconventional Computing, 2009.
- [3] W.M. Stevens, Fluidic logic 4-bit integer square root circuit based on siphons, YouTube, 2013.
- [4] W.M. Stevens, private communication, 2014.
- [5] C. L. Stong, How Streams of Water Can Be Used to Create Analogues of Electronic Tubes and Circuits, Scientific American, 1962.

5. まとめ

サイフォンを用いた新しい計算システムとして 2 つのものを提案した。最初に提案したのは、1-tube 入力によるサイフォン計算システムである。1-tube 入力によるサイフォン計算システムでは、NOT 回路、AND 回路、COPY 回路はそれぞれ 1 つのサイフォンで実現している。しかし、NOT 回路において、入力後の開栓操作が必要なため、自動開栓システムを新たに構築しない限りは、入力者が開栓作業を強いられてしまう。

次に、2-tube 入力によるサイフォン計算システムを提案した。2-tube 入力方式では、NOT 計算にサイフォンは不要であり、AND 回路には 4 つ、COPY 回路には 2 つのサイフォンが必要である。必要なサイフォン数は増えているが、開栓操作が不要で、入力した後は自動的に計算結果が出力される。

1-tube 入力方式、2-tube 入力方式のいずれも入力に関するタイミングに制限は一切なく、このことは既存システムでは実現されていなかった利点である。